

## Análisis energético y exergético de una planta de producción de hidrógeno electrolítico

<sup>1</sup>Diego Osmar Galeano Espinola, <sup>1</sup>Luis Evelio Acevedo García

[diego.espinola@aluno.unila.edu.br](mailto:diego.espinola@aluno.unila.edu.br), [luis.acevedo@unila.edu.br](mailto:luis.acevedo@unila.edu.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Integração Latinoamericana - UNILA

### Resumen

Fue realizado un análisis termodinámico de una planta de producción de hidrógeno a partir la electrólisis del agua, ubicada en la ciudad de Foz de Iguazú – Brasil, con una capacidad de producción de 10 Nm<sup>3</sup>/h. Las diferentes etapas del proceso fueron evaluadas por medio de balances de masa, energía y exergía, analizando desde el suministro de energía eléctrica y agua, hasta el almacenamiento del hidrógeno presurizado a 350 bar. Los parámetros considerados para los cálculos son datos reales de operación nominal de la planta, que fueron utilizados como variables de entrada de un modelo termodinámico implementado en el EES (Engineering Equation Solver), del cual se obtuvo como resultados eficiencias globales de energía y exergía de 57.1% y 53.1% respectivamente. También se identificó que, al utilizar energía eléctrica para producir hidrógeno, las principales pérdidas termodinámicas están asociadas al proceso de separación del agua, y a las irreversibilidades de la transferencia de calor para enfriamiento y calentamiento de los procesos de purificación y compresión de los gases. Las pérdidas asociadas al calor residual, debido a su baja calidad, no son tan representativas como acostumbran indicar los análisis energéticos.

**Palabras claves:** Planta de hidrógeno, Balance energético, Balance exergético, Electrólisis del agua, Eficiencia.

### Abstract

*There was performed a thermodynamic analysis of an hydrogen production plant from water electrolysis in the city Foz do Iguaçu- Brazil, with a production capacity of 10 Nm<sup>3</sup>/h. The different stages of the process were evaluated using mass, energy and exergy balances, analyzing from the electricity and water supply, to the storage of pressurized hydrogen at 350 bar. The parameters considered for the calculations were actual data from nominal operation of the system, which were used as input variables for a thermodynamic model implemented in EES (Engineering Equation Solver), obtaining as results overall energy and exergy efficiencies of 57.1% and 53.1 % respectively. It was also identified that by using electrical energy to produce hydrogen, the main thermodynamic losses are associated with water splitting process, irreversibilities of heating and refrigeration in the purification and compression stages. The losses associated with residual heat, due their low quality, are not as representative as energy analysis usually indicates.*

**Keywords:** Hydrogen plant, Energy balance, Exergy balance, Water electrolysis, Efficiency.

## 1. Introducción

Hasta el año 2015, más de 1,2 billones de personas aún no tenían acceso a electricidad y 2.700 millones de personas ponían en riesgo su salud recurriendo al uso tradicional de biomasa sólida para cocinar. Estos valores correspondían respectivamente a un 17 % y 38% de la población mundial (IEA, 2015). De este número, la mayor parte vive en países en desarrollo. Aunque cada país es único considerando su historia particular, todos los países comparten las mismas tendencias en cuanto a demanda energética y desarrollo económico (ZHUIJUNG; BOQIANG, 2012). El crecimiento continuo

de la demanda energética mundial y la preocupación con el ritmo de degradación del medio ambiente, han estimulado debates acerca de la sustentabilidad, la planificación y utilización más eficiente de la energía en diferentes sectores de la sociedad (ONU, 2011).

El progreso de las sociedades históricamente estuvo vinculado a la disponibilidad y capacidad de aprovechamiento de las fuentes energéticas. Después de la revolución industrial gran parte de las necesidades energéticas fueron, en su gran mayoría, abastecidas por procesos de conversión termoquímicos a partir de fuentes fósiles, que son basados en sistemas de combustión (TURNS, 2013), responsables por una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> (LUCIA, 2014). Fuentes fósiles no son infinitas ni renovables, sus procesos de conversión termoquímica han alcanzado sus límites de eficiencia energética, además de tener un fuerte impacto ambiental. Estas fuentes han generado conflictos geo-políticos, debido a que solo algunos países son beneficiados con yacimientos naturales de estas (CZUCZ et al., 2010).

Con la creciente demanda de energía eléctrica, queda evidente la necesidad de optimizar el uso y de expandir la oferta de energía. La tendencia mundial es la de diversificar la matriz energética, con nuevos emprendimientos de energías renovables, tales como: centrales térmicas a biocombustibles, mini centrales hidroeléctricas, parques eólicos, plantas solares fotovoltaicas y células a combustibles. (OLIVEIRA; SILVA; TOSTES, 2015; OLIVEIRA, 2014). Uno de los principales inconvenientes de las energías renovables es la intermitencia, por lo cual no se puede prever o planear, totalmente y de forma eficiente la cantidad de energía ofertada, las variaciones periódicas en la generación dificultan el atendimento adecuado de la curva de carga media (FURLAN, 2012).

Una de las tecnologías más utilizada para afrontar este problema es el almacenamiento de energía mediante acumuladores electroquímicos, es decir baterías. Estos almacenadores presentan grandes restricciones en cuanto a los procedimientos de carga y descarga eléctrica, más importante aún, el peso y volumen necesarios para almacenar cantidades significativas de energía (FERREIRA, 2008). Además de la falta de gestión en la operación y elevados costos de mantenimiento preventivo y correctivo (LI et al., 2016).

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, sin embargo, su concentración en la atmosfera terrestre es menor que 0,00005% por volumen (LUTGENS; TARBUCK, 2000), lo cual dificulta su obtención directa del aire. Por este motivo el hidrógeno no es considerado como una fuente de energía primaria, sino como un vector energético extraído de otras sustancias, lo cual representa un gasto energético. El hidrógeno es un vector energético interesante, ya que la tecnología para su uso ha demostrado competitividad al compararlo con tecnologías tradicionales, y su estado del arte está bastante desarrollado. Entre sus ventajas podemos resaltar su elevada capacidad energética por unidad de masa, y el hecho de que puede ser producida sin emitir gases de efecto invernadero (CABEZAS et al, 2014). También es importante resaltar que las baterías tradicionales poseen una vida útil mucho menor que el sistema basado en hidrógeno (MATOS, 2013).

El interés en la utilización del hidrógeno como vector energético viene aumentando en el sector productivo (MATOS, 2013; XIE et al, 2013). Algunos proyectos desarrollados en el área de producción de hidrógeno, como almacenador de energía demostraron su viabilidad técnica (GAMOON, 2006; MARTIN et al, 2010; FURLAN, 2012; MATOS, 2013; CABEZAS et al, 2014).

Los procesos principales para la producción de hidrógeno incluyen reforma a vapor de gas natural, oxidación parcial de oleos pesados, gasificación de carbón, electrólisis del agua, ciclos termoquímicos, además de procesos fotoquímicos, electroquímicos y biológicos (ROSEN, 1994; DINCER; ACAR, 2015; XIE et al, 2013). De todos estos procesos la electrólisis del agua es una de las tecnologías más desarrolladas, robustas y utilizadas actualmente, que, en conjunto con el crecimiento del mercado de energías renovables, representa un gran potencial como almacenador de energía (FERNANDEZ; CANO, 2012). La electrólisis, requiere energía eléctrica en corriente continua, la cual puede ser obtenida de fuentes renovables o de energía residual que no es aprovechada, como el caso de las grandes hidroeléctricas.

El proceso de producción en una planta de hidrógeno a partir de energía eléctrica ya alcanzó eficiencias entre 64-80% (COSKUN et al, 2012; DOE, 2015), y la utilización del hidrógeno para generación de energía eléctrica mediante células a combustible ha ganado mayor credibilidad en los últimos años (FERNANDEZ; CANO, 2012). El proceso necesita aproximadamente  $0,8\text{m}^3$  de hidrógeno para producir 1kWh de energía eléctrica (MATOS, 2013), con eficiencias entre 50-70% para células de intercambio protónico PEMFC, 40% y hasta 90% para células a ácido fosfórico con cogeneración (BADWAL et al, 2014). Sin embargo, se espera que estas eficiencias puedan ser mejoradas significativamente a través de perfeccionamientos en el diseño de componentes, materiales y avances en el control y la integración de procesos (JIANJUN, 2015).

Se proyecta para el 2080 que 90% de la energía procedería del hidrógeno (LINARDI, 2010). Investigadores sugieren que, en un futuro próximo, los sistemas energéticos pasarán por una transición a una era en la cual los principales portadores de energía serán la electricidad y el hidrógeno (BALL; WIETSCHEL, 2009; SGOBBI et al, 2015). En Alemania ya está ocurriendo esta transición, por medio del programa nacional denominado *Hydrogen Fuel Cell Germany* se planea construir 400 estaciones de suministro de hidrógeno hasta 2023 (Fuel Cells Bulletin, 2016). Los puntos críticos para alcanzar la denominada economía del hidrógeno están en su obtención, su almacenamiento, y en la tecnología para su aprovechamiento energético ya sea para la conversión electroquímica, o por combustión directa (SGOBBI et al, 2015).

La realización de un análisis termodinámico de los sistemas de producción de hidrógeno es necesaria para evaluar e identificar las etapas del proceso donde existe mayor potencial de mejoría. Generalmente, la eficiencia de un proceso se evalúa desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica (balance energético), el cual es un análisis cuantitativo de la energía. Sin embargo, al realizar un balance exergético, se amplía la visión del proceso y se puede identificar que etapas están disminuyendo la calidad de la energía, característica que está relacionada a la disponibilidad de trabajo

útil, propiedad definida en la segunda ley de la termodinámica (CENGEL; BOLES, 2012; MORAN; SHAPIRO, 2006).

La energía es una cantidad escalar que no puede ser observada directamente, pero puede ser medida y evaluada indirectamente (DINCER; CENGEL, 2001). Es una propiedad de la materia, la cual se encuentra en varias formas clasificadas en dos grupos principales: *forma macroscópica* (energía cinética, energía potencial que incluye gravitacional, centrífuga eléctrica y magnética) las cuales dependen de un marco referencial. Y *forma microscópica* (energía Interna), es aquella relativa a la estructura y grado de actividad molecular, estas formas son independientes de un marco referencial (DINCER; ROSEN, 2007). La primera ley de la termodinámica, o ley de la conservación de la energía, establece que, a pesar de que la energía puede cambiar de forma, esta no se crea ni se destruye, la energía se transfiere hacia o desde un sistema mediante tres formas: calor  $Q$ , trabajo  $W$  y flujo de masa  $\dot{m}$ , siempre sufriendo degradación de su calidad (MORAN; SHAPIRO, 2006). Sin embargo, la primera ley no provee información acerca de la dirección espontánea de los procesos, es decir, los aspectos de la reversibilidad de estos (DINCER; CENGEL, 2001), sirve apenas como una herramienta para contabilizar la cantidad de energía durante un proceso. La segunda ley establece la diferencia entre la calidad de las diferentes formas de energía, la energía se considera más útil cuando es más fácil que fluya de una sustancia a otra, mediante esta ley se identifica el proceso de degradación de energía durante los procesos (CENGEL; BOLES, 2012). También explica porque algunos procesos pueden ocurrir espontáneamente y otros no, el enunciado de Clausius afirma que la transferencia de calor ocurre espontáneamente solo en la dirección de disminución de temperatura (DINCER; CENGEL, 2001). Además, el enunciado de Kelvin-Planck establece que es imposible que un dispositivo reciba una cierta cantidad de calor y lo convierta en la misma cantidad de trabajo, aunque sí es posible convertir trabajo a una cantidad equivalente de calor (VAN WYLEN; SONNTAG, 1965).

La exergía, conocida como disponibilidad de energía o energía utilizable, consiste en el máximo trabajo útil que puede ser obtenido de un sistema, hasta que este alcance un equilibrio con el ambiente que lo rodea. Por lo tanto, la exergía es un atributo del sistema y de su entorno (MORAN; SHAPIRO, 2006). Tiene la característica de que se conserva solo en procesos reversibles o ideales, pero como los procesos reales son irreversibles, la exergía siempre se destruye. Esta exergía destruida es directamente proporcional a la entropía generada durante el proceso (CENGEL; BOLES, 2012). Así como la energía, la exergía puede ser transferida a través de los límites de un sistema, para cada tipo de transferencia de energía existe una correspondiente transferencia de exergía (DINCER; ROSEN, 2007).

Como la exergía está asociada a una cantidad de energía, es una evaluación cualitativa de la utilidad o calidad de la energía. El análisis exergético reconoce que, aunque la energía no se crea ni se destruye, sufre una degradación de su calidad, a medida que llega a un estado de equilibrio completo con su entorno, en donde ya no es posible obtener trabajo útil (DINCER; ROSEN, 2007). La evaluación exergética de un proceso permite cuantificar la pérdida de eficiencia de sistemas o subsistemas, debido

a la pérdida de calidad de la energía, indicando donde el proceso puede ser mejorado y detectando cuantitativamente el potencial de mejoría de procesos termodinámicos (GUTIERREZ, 2014).

Análisis energéticos de producción de hidrógeno electrolítico demostraron que la temperatura del medio ambiente afecta significativamente la producción (COSKUN et al, 2011). En este sentido, ciudades con temperaturas medias más elevadas como el caso de Foz do Iguazú-Brasil, podrían obtener mayores eficiencias globales del sistema. Por lo tanto, un análisis termodinámico detallado es necesario para evaluar el funcionamiento de estos proyectos. La existencia de una planta piloto de producción de hidrógeno instalada en la Fundación Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI, 2016), proyecto financiado en conjunto por la Electrobras y la Central Hidroeléctrica Itaipu Binacional para aprovechar la energía eléctrica excedente generada en la hidroeléctrica, presenta una oportunidad de evaluar termodinámicamente un sistema real, para identificar etapas en el proceso donde existe mayor potencial de mejora y posteriormente aumentar la eficiencia global.

Un modelo termodinámico puede lograr avances en el proceso de dimensionamiento de nuevas plantas, en el análisis y operación de las existentes. El desarrollo correcto del análisis de la primera y la segunda ley de la termodinámica permite evaluar un proceso real y cuantificar el grado de aprovechamiento de energía suministrada, identificar la ubicación, tipos y causas de las pérdidas, hallando posibles mejorías. Además, el análisis termodinámico es una herramienta de estudio y diagnóstico de sistemas, útil en el diseño de soluciones alternativas que buscan reducir la utilización innecesaria de recursos, así como testes experimentales, y por ende los impactos potenciales generados por la misma, direccionando hacia el desarrollo sostenible.

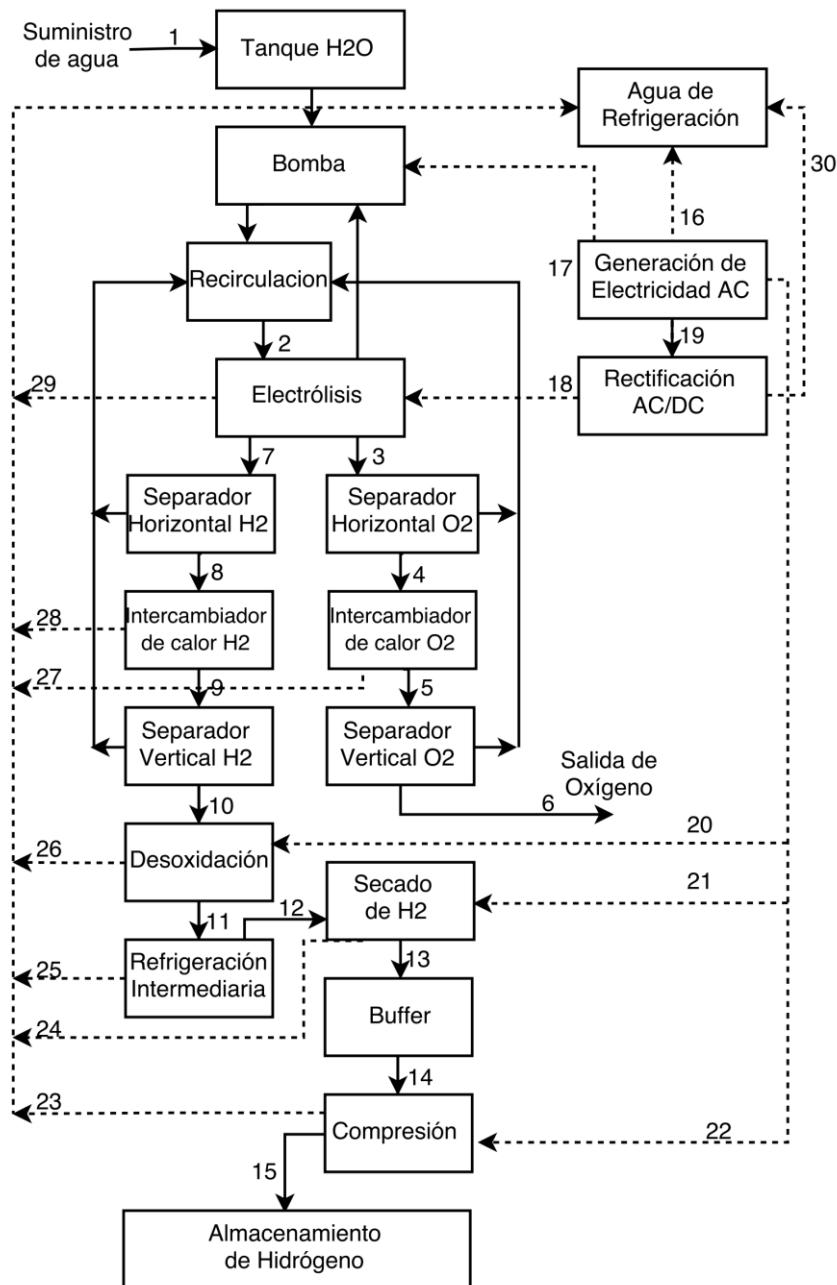
El objetivo del trabajo es la evaluación termodinámica del proceso de producción de hidrógeno electrolítico en una planta ya existente.

## **2. Materiales y métodos**

La planta de producción de hidrogeno de la Fundación del Parque Tecnológico de Itaipu, posee una capacidad de producción de  $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , y un consumo medio total de  $70\text{kW}$ . Una capacidad de almacenamiento máxima de  $800 \text{ Nm}^3$ . Consumiendo aproximadamente  $10 \text{ L/h}$  de agua desmineralizada durante la operación.

Los procesos y equipamientos para la producción de hidrógeno y oxígeno mediante la electrólisis alcalina del agua de la planta están representadas esquemáticamente en el diagrama de flujos de la Figura 1, y el principio de funcionamiento descripto a continuación. La línea de producción del hidrógeno está indicada a partir de la salida del electrolizador en el estado 3, hasta el 15, mientras que la línea del oxígeno va desde el 3 hasta el 4.

Figura 1: Diagrama de flujos de las etapas del proceso de una planta de producción de hidrógeno electrolítico.



Fuente: Autoría propia. Las líneas sólidas corresponden a flujo de materia, y las líneas punteadas corresponden a flujos de energía en forma de calor o electricidad

Se suministra energía eléctrica en corriente alterna para alimentar el proceso (sistema de control, bombas, compresor, secadores, etc.) y un porcentaje de esta se convierte, por medio de un rectificador a corriente continua necesaria para el proceso de la electrólisis.

Bombas hidráulicas transportan agua desmineralizada e hidróxido de potasio para formar la solución del electrolito, aumentando la conductividad del medio. Esta solución es introducida al electrolizador, donde se realiza la electrólisis alcalina a una temperatura aproximada de 80°C. Se utiliza agua desmineralizada para evitar acumulación de impurezas y corrosión en los electrodos (GUGLIELMINI, 2006).

Los electrolizadores son equipamientos formados por un conjunto de células electrolíticas empiladas. Cada célula está formada por dos placas de electrodos (cátodo y ánodo) metálicos bipolares y separados por un diafragma polimérico, instalados en serie o paralelo, dependiendo de la configuración del equipamiento para obtener la máxima capacidad de generación requerida (SANTOS; SEQUEIRA; FIGUEIREDO, 2013). Las células son alimentadas por medio de un flujo de corriente eléctrica continua inducidas en las placas externas, controlados por un PLC (Controlador Lógico Programable). Durante el proceso de producción de hidrógeno y oxígeno, parte de esa energía eléctrica es disipada en forma de calor, alcanzando la temperatura de operación del proceso, la cual es controlada enfriando el circuito de la mezcla gas y electrolito mediante intercambiadores de calor tipo serpentina (flujo cruzado), utilizando agua como fluido refrigerante.

Como producto de la reacción de electrólisis, las soluciones del hidrógeno-electrolito y oxígeno-electrolito son expelidos hacia las dos líneas principales, en forma de pequeñas burbujas de vapor de los electrolizadores, a una presión media de 20 bar. Esta solución se separa internamente por medio de filtros poliméricos en el circuito neumático de los separadores horizontales y verticales, respectivamente. El electrolito en la fase líquida es retenido y realimentado a los electrolizadores por medio de succión de la bomba hidráulica.

En la línea del hidrógeno, luego de la salida del segundo separador (vertical), el hidrógeno, conteniendo una pequeña concentración de oxígeno es direccionado para un vaso de presión a 20.5 bar y distribuido para las etapas de secado y medición de flujo. Para reducir la concentración del oxígeno en el hidrógeno, por debajo del límite requerido, el hidrógeno es precalentado y alimentado a un reactor catalítico, donde el oxígeno es reducido mediante reacción estequiométrica con una pequeña fracción de hidrógeno. El hidrógeno desoxidado es enfriado con el intercambiador de calor intermediario y el vapor de agua condensado. Los últimos residuos de humedad son retirados por medio de un filtro y luego por adsorción dinámica en un lecho granular de material adsorbente en los secadores. Toda el agua es realimentada en el electrolizador por medio de las bombas de succión. Al salir de los secadores, el hidrógeno es analizado por sensores para monitorear la pureza. En paralelo, a este proceso, en la otra línea el oxígeno es liberado a la atmósfera.

Luego de la etapa del secado, el hidrógeno se dirige hacia el tanque o buffer, que tiene una capacidad de aproximadamente 700 litros de hidrógeno, el cual sirve para evitar fluctuación en la producción de hidrógeno, además de asegurar una alimentación estable requerida para la etapa siguiente: la compresión. En el proceso de compresión; hidrógeno a 20 bar en la entrada aumenta la presión hasta 350 bar, utilizando 4kW de potencia, para finalmente ser almacenado en el conjunto de los cilindros.

El sistema fue subdividido en sus diferentes etapas según la Figura 1. Inicialmente fueron realizados balances de masa y energía (primera ley de la termodinámica) a partir de volúmenes de control definidos entre los puntos 1, 2, 3 etc. Para la realización de los cálculos fueron utilizados los parámetros termodinámicos de operación nominal de la planta, introducidos en el EES (*Engineering*

*Ecuation Solver*), un programa general de resolución de ecuaciones, cuya principal ventaja es poseer una base de datos de propiedades termodinámicas y de transporte con elevada precisión (FCHART, 2016). El EES fue utilizado para obtener los flujos y propiedades como calor, trabajo o temperatura de salida de algunos procesos del sistema. Para estos cálculos se consideró las ecuaciones del balance de masa para un volumen de control con flujo estacionario de múltiples entradas y salida (Ecuación 1), además de la relación de balance para un sistema general de flujo estacionario (Ecuación 2) aplicando la primera ley (CENGEL; BOLES, 2012):

$$\sum_{entrada} \dot{m} = \sum_{salida} \dot{m} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{salida} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + g \cdot z \right) - \sum_{entrada} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (2)$$

donde  $\dot{m}$  [kg/s] es el flujo másico,  $\dot{Q}$  [kW] es la tasa de transferencia de calor entre el volumen de control y sus alrededores (por convención positivo cuando entra al sistema y negativo cuando se transfiere a los alrededores),  $\dot{W}$  [kW] representa toda forma de trabajo de flecha (no incluye trabajo debido a variación de volumen del sistema, por convención positivo cuando es realizado por el sistema y negativo cuando es introducido al volumen de control),  $h$  [kJ/kg] es la entalpía del flujo,  $V$  [m/s] es la velocidad del fluido,  $z$  [m] es la elevación, y  $g$  [m/s<sup>2</sup>] es la gravedad.

Para el balance exergético, se define un modelo referencial conocido como estado muerto, en el cual el sistema se encuentra en equilibrio mecánico, térmico y químico con el ambiente, en este estado la exergía es nula (DINCER; ROSEN, 2007). Para este análisis se adoptó un modelo considerando  $T_0 = 293.15 \text{ K}$  y  $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$  y compuestos químicos referenciados en la tabla 1 (SZARGUT, 2007).

Para poder evaluar la exergía química  $e^{CH}$  [kJ/kg] de un sistema, se utiliza la definición de propiedad estándar de formación de las sustancias que participan en el proceso, en el caso específico se utiliza la exergía estándar. Mostrada en la tabla 1 junto con la fórmula química, masa molecular algunas de las sustancias más comunes.

*Tabla 1: Exergías estándar molares de compuestos.*

<i>Sustancia</i>	<i>Formula Química</i>	<i>Masa molecular (kg/kmol)</i>	<i>Exergía química standard (kJ/kmol)</i>
<i>Nitrógeno</i>	N <sub>2</sub> (g)	28.0134	720
<i>Oxígeno</i>	O <sub>2</sub> (g)	31.9988	3970
<i>Dióxido de Carbono</i>	CO <sub>2</sub> (g)	44.0095	19480
<i>Agua</i>	H <sub>2</sub> O (g)	18.01534	9500
<i>Hidrógeno</i>	H <sub>2</sub> (g)	2.01594	236100
<i>Metano</i>	CH <sub>4</sub> (g)	16.04303	831200

*Fuente: SZARGUT, 2007*



Para un flujo estacionario el balance de exergía de un volumen de control se define a continuación (MORAN; SHAPIRO, 2006):

$$\sum_j (1 - \frac{T_0}{T_j}) \dot{Q}_j - \dot{W} + \sum_{entrada} \dot{m}_i \cdot e_i - \sum_{salida} \dot{m}_o \cdot e_o - \dot{E}_D = 0 \quad (3)$$

donde  $\dot{Q}_j [kW]$  es la tasa de transferencia de calor en los límites del volumen de control, cuya temperatura es  $T_j [K]$ .  $\dot{E}_D [kJ/kg]$  es la tasa de consumo o destrucción de exergía, definida por:

$$\dot{E}_D = T_0 \cdot \dot{\sigma}_{CV} \quad (4)$$

donde  $\dot{\sigma}_{CV} [kJ/kg \cdot K]$  es la tasa de producción de entropía, obtenida del balance de entropía de un volumen de control con flujo estacionario (MORAN; SHAPIRO, 2006) :

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_{entrada} \dot{m}_i \cdot s_i - \sum_{salida} \dot{m}_o \cdot s_o + \dot{\sigma}_{CV} = 0 \quad (5)$$

donde  $s [kJ/kg \cdot K]$  es la entropía específica en un determinado estado. Luego se tiene que la exergía destruida es proporcional a la entropía producida (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Los subíndices  $i$  y  $o$  (Ecuación 5) denotan entrada y salida respectivamente para la exergía específica  $e [kJ/kg]$ , la cual puede expresarse en términos de cuatro componentes, exergía física  $e^{PH} [kJ/kg]$ , cinética  $e^{KN} [kJ/kg]$ , potencial  $e^{PT} [kJ/kg]$  y química  $e^{CH} [kJ/kg]$ , donde:

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

$$e^{KN} = \frac{1}{2} V^2 \quad (7)$$

$$e^{PT} = gz \quad (8)$$

$$e^{CH} = \sum_{i=1}^j y_i \bar{e}^{CH} + \bar{R} T_0 \sum_{i=1}^j y_i \ln(y_i) \quad (9)$$

donde  $y_i$  es la fracción molar, y  $\bar{e}^{CH} [kJ/mol]$  es la exergía molar química del  $i$ -ésimo componente en una mezcla gaseosa.

Por lo tanto, para la exergía específica se calcula según la expresión (DINCER; ROSEN, 2007):

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{1}{2} V^2 + gz + e^{CH} \quad (10)$$

Para el caso de los procesos dentro de la planta de producción de hidrógeno pueden ser despreciadas las participaciones de la energía cinética y potencial en los balances (JALALZADEH, 2008).

### 3. Discusión de resultados

Utilizando las variables de estado (Temperatura y Presión), el trabajo introducido al sistema (potencias nominales demandadas), en conjunto con los balances de masa (ecuación 1) y de energía (ecuación 2) de los diferentes subsistemas, fue posible describir los flujos de masa y energía, obteniendo la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del diagrama de flujos de la figura 1.

Número del flujo	Flujo másico (kg/s)			T (°C)	P (kPa)	Flujo de energía Entre el sistema y el entorno (kW)
	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>			
1	0	0.00277	0	35	101.3	-
2	0	0.00277	0	35	2110	-
3	0	0	0.001986	80	2110	-
4	0	0	0.001986	80	2100	-
5	0	0	0.001986	35	2048	-
6	0	0	0.001986	35	2048	-
7	0.0002667	0	0	80	2110	-
8	0.0002667	0	0	80	2100	-
9	0.0002667	0	0	35	2090	-
10	0.0002667	0	0	35	2050	-
11	0.0002667	0	0	80	2050	-
12	0.0002667	0	0	25	2040	-
13	0.0002667	0	0	85	2040	-
14	0.0002667	0	0	85	2040	-
15	0.0002667	0	0	577.7	35000	-
<b>Flujo de Calor y electricidad</b>						
16	-	-	-	-	-	-5.5*
17	-	-	-	-	-	-0.1597
18	-	-	-	-	-	-50*
19	-	-	-	-	-	-53
20	-	-	-	-	-	-0.5*
21	-	-	-	-	-	-1*
22	-	-	-	-	-	-4*
23	-	-	-	577.7	-	-2.045
24	-	-	-	85	-	-0.7692
25	-	-	-	80	-	-0.2116
26	-	-	-	80	-	-0.3268
27	-	-	-	80	-	-0.0846
28	-	-	-	80	-	-0.1732
29	-	-	-	80	-	-14.2
30	-	-	-	80	-	-3

Fuente: cálculos propios y valores nominales de los dispositivos\* (H2Nitidor, 2014)

Para el cálculo de la potencia consumida en las bombas, fue considerado un proceso adiabático, y su eficiencia obtenida de la curva característica del fabricante (NU.ER.T., 2012).

El bajo porcentaje de humedad y de oxígeno contenido en el hidrogeno de salida del electrolizador fue despreciado para este análisis, debido a poseer valores poco significativos de energía y exergía.

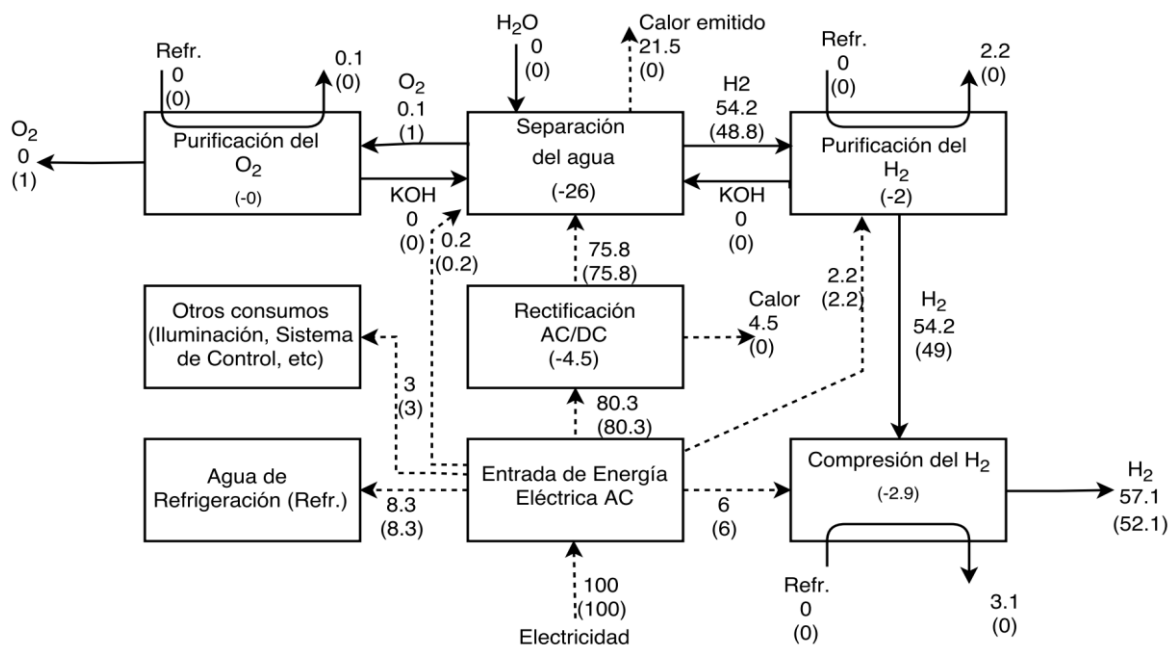
La temperatura máxima en el estado 15 (577.7 °C), al comprimir el hidrógeno, fue calculada utilizando un balance energético, a partir de la eficiencia isentrópica de la compresión de 56% (GARDINER, 2009). Ya definido el estado 15, fue calculado el flujo de calor extraído por la refrigeración en dos etapas del compresor, hasta alcanzar los 90 °C necesarios para el almacenamiento (H2NITIDOR, 2013).

Un diagrama de procesos simplificado es mostrado en la figura 2, donde el conjunto de tanque de agua, las bombas de circulación y electrolizador son agrupados en un solo subsistema denominado “Separación del agua”. En la línea del oxígeno (3-6), el conjunto de separador horizontal, intercambiador de calor y separador vertical son agrupados en otro subsistema llamado “Purificación

del oxígeno”. En la línea del hidrógeno (7-15), el separador horizontal, el intercambiador de calor, el separador vertical, la desoxidación, la refrigeración intermedia y el secado son agrupados en un nuevo grupo como “Purificación del hidrógeno”. De la misma manera, el buffer, compresor, y almacenamiento son denominados “Compresión del hidrógeno”.

Este nuevo diagrama incluye un resumen de los cálculos realizados para el análisis exergético, utilizando la tabla 1 y 2 junto con las ecuaciones (3) a (10). Valores normalizados de los flujos de energía y exergía son mostrados en la figura 2. Estos valores fueron normalizados dividiéndose por la entrada total de energía y multiplicando por 100. La energía total coincide con la entrada total de exergía porque toda energía eléctrica es considerada como exergía (DINCER; ROSEN, 2007).

Figura 2: Diagrama de flujos simplificado para la electrólisis del agua.



Fuente: Autoría propia

Los valores positivos y sin paréntesis corresponden al flujo de energía, y los valores positivos entre paréntesis corresponden al flujo de exergía. Las tasas de destrucción de exergía son los valores negativos entre paréntesis. El agua de refrigeración está denotado como Refr.

Analizando las salidas, se tiene que la mayor parte de la energía no aprovechada es emitida al medio ambiente en forma de calor. Estos flujos presentan un elevado contenido de energía sin embargo su contenido de exergía es muy reducido, es decir su potencial de aprovechamiento es muy limitado.

Con respecto a los productos de la reacción, el oxígeno posee valor energético y exergético despreciable cuando comparado con el hidrógeno que contiene el mayor porcentaje de la energía y exergía de salida del sistema. Según estos resultados, el análisis energético indica que tanto el hidrógeno como el calor transferido hacia afuera del sistema son valiosos. Sin embargo, el análisis exergético indica que solo el hidrógeno posee valor y que el calor retirado del sistema ya no posee potencial de aprovechamiento. Al observar el porcentaje de energía retirado por transferencia de calor, el análisis

energético indica que para reducir las pérdidas se debe disminuir el calor residual, mientras que el análisis exergético indica que deben reducirse los consumos internos de exergía, principalmente dentro del electrolizador, en la conversión de corriente alterna a corriente continua y en la compresión (en orden decreciente según la tasa de destrucción de exergía).

A continuación, se calculan las eficiencias energéticas y exergéticas globales de la producción del hidrógeno, como también las eficiencias de los procesos en los subsistemas. La eficiencia energética (de la primera ley) se define como el cociente entre la energía útil de salida y la cantidad de energía gastada para obtenerla. De forma similar, la eficiencia exergética (de la segunda ley) se calcula como el cociente entre la exergía recuperada y la exergía proporcionada (CENGEL; BOLES, 2012).

*Tabla 3: Eficiencias calculadas para las diferentes etapas de la producción del hidrógeno*

Proceso	Eficiencia Energética (%)	Eficiencia Exergética (%)
Todo el Sistema	57.1	53.1
Electrólisis del H <sub>2</sub> O	75.6	65.9
Rectificación AC/DC	94.3	94.3
Compresión del H <sub>2</sub>	49.8	52.3
Purificación H <sub>2</sub>	56.1	10.3
Purificación O <sub>2</sub>	75	14.2

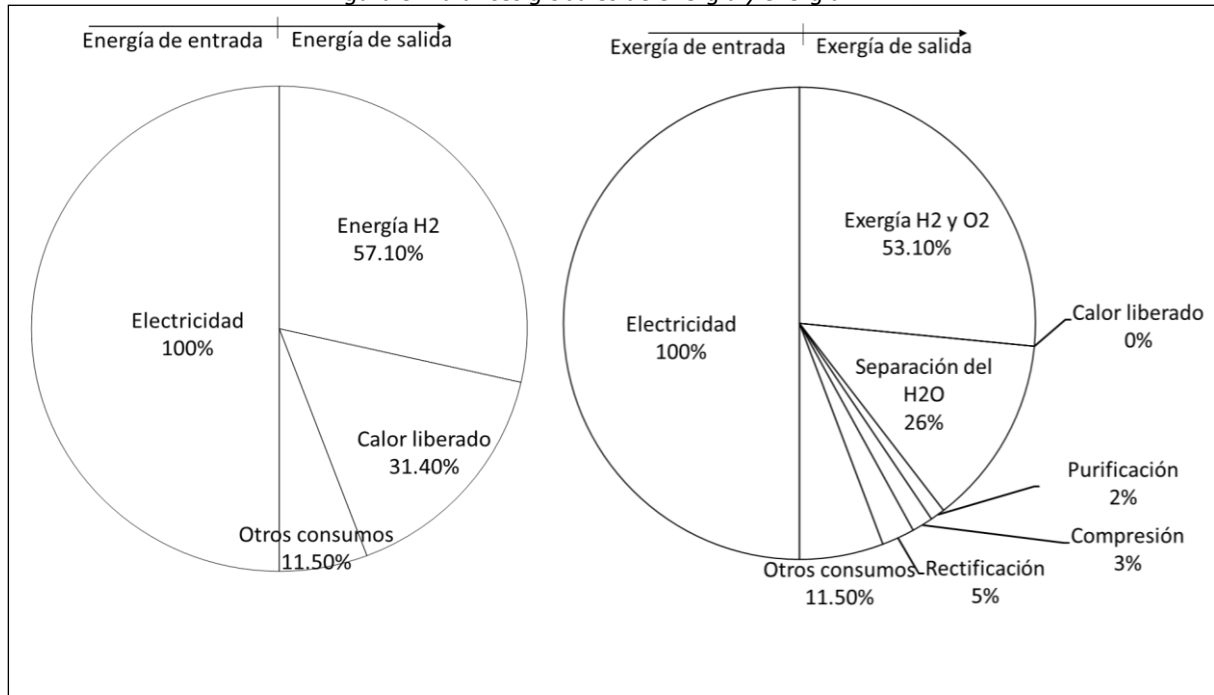
*Fuente: Autoría propia*

Las eficiencias (energética y exergética) de todo el sistema son próximas debido que las magnitudes de energía y exergía que se introducen son las mismas, aunque las eficiencias de algunos procesos individuales difieren notablemente. En la electrólisis del agua, existe menor eficiencia exergética debido a las pérdidas internas causadas por las irreversibilidades de la reacción. En el proceso de rectificación las eficiencias coinciden, debido a que poseen la misma entrada y salida. Para el proceso de compresión tenemos una eficiencia exergética ligeramente mayor, consecuencia del aumento de la componente correspondiente a la exergía física ( $e^{PH}$ ) del gas debido a la compresión y al aumento de la temperatura. Sin embargo, el compresor necesita ser refrigerado constantemente y el calor extraído mediante el agua de refrigeración, representa una disminución en la eficiencia energética. Las eficiencias exergéticas en la purificación del hidrógeno y el oxígeno son muy reducidas debido a la baja calidad de la energía del agua de refrigeración.

La validez de los resultados de las eficiencias del electrolizador fue verificada comparando con otros análisis termodinámicos de plantas de electrólisis encontrados en la literatura (ROSEN, 1994; JALALZADEH, 2008; COSKUN et al, 2011) constatando que los valores calculados se encuentran dentro de los rangos esperados para este tipo de planta.

La figura 3 muestra los balances globales. El balance energético a la izquierda muestra que el 57.1% de la energía total de entrada es recuperada en forma de hidrógeno y el 42.9% perdido en forma de calor y otros consumos. El balance exergético a la derecha, muestra que 53.1% de la exergía de entrada es recuperada como hidrógeno y el 46.9% es consumida en las diferentes etapas de la producción.

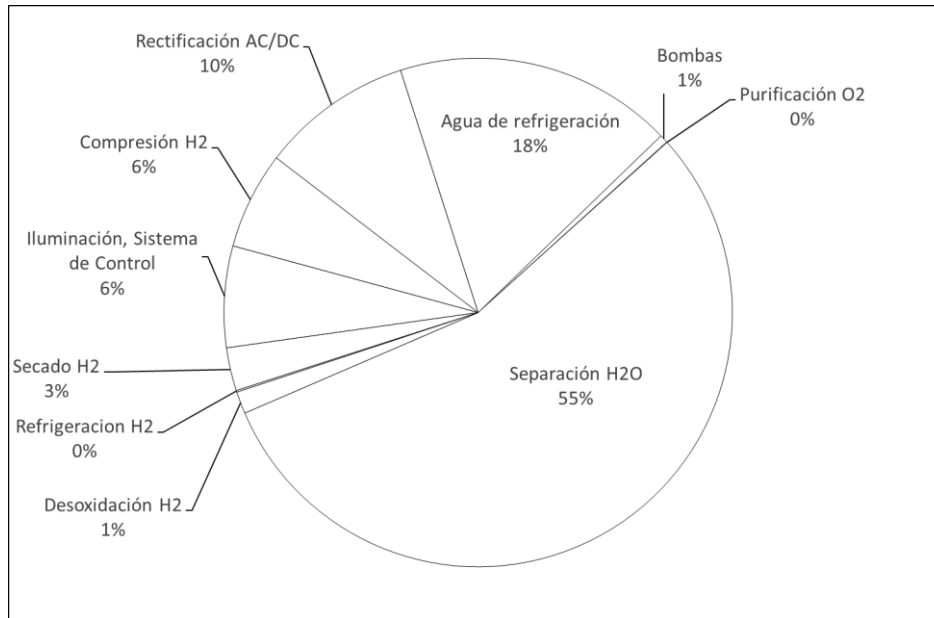
*Figura 3: Balances globales de energía y exergía*



*Fuente: Realización propia*

La figura 4 muestra en detalle la distribución del 46.9% de exergía consumida en cada una de las etapas del sistema. Las pérdidas internas del electrolizador corresponden al mayor porcentaje de consumo de exergía, seguido de las pérdidas en el proceso de utilización de energía eléctrica para enfriar el agua del circuito de refrigeración, utilizado para la extracción de calor del sistema mediante los intercambiadores de calor, y en el compresor.

Figura 4: Porcentaje de exergía destruida en cada proceso



Fuente: Autoría propia

Otros de los procesos responsables del consumo de exergía corresponden a la rectificación de la corriente alternada, y a la compresión del hidrógeno, proceso en donde se genera un aumento de la temperatura. Los procesos de secado y desoxidación también participan del consumo de la exergía debido a la utilización de calentadores eléctricos que convierten energía eléctrica de gran calidad a energía térmica de menor calidad, necesaria para los procesos en cuestión.

#### 4. Conclusiones

La literatura demuestra una madurez en la tecnología de generación de hidrógeno por electrolisis y en los métodos de análisis termodinámicos, aunque no son comunes estudios de este tipo de plantas. Este trabajo pretende contribuir en el área demostrando la utilidad del análisis exergético como una herramienta de estudio, diagnóstico, y la propuesta de alternativas que reduzcan la utilización innecesaria de recursos

El análisis energético puede diferir en mayor o menor medida del análisis exergético. El análisis energético indica que la cantidad de energía liberada a través del calor es significativa, así un aumento de la eficiencia total podría obtenerse disminuyendo esta energía emitida. Por otro lado, el análisis exergético apunta que todo el calor emitido al ambiente posee valor exergético despreciable, con lo cual esfuerzos de mejoría pueden ser direccionados a otros aspectos.

Los subsistemas de separación del agua y refrigeración son los principales responsables por la degradación de la energía útil. Las irreversibilidades internas asociadas con el proceso de la electrolisis son altas, así como la las irreversibilidades asociadas al uso eléctrico para control térmico, es decir, la conversión de electricidad en calor, y el uso de electricidad para el ciclo de refrigeración.

La planta de producción de hidrógeno analizada presenta una eficiencia global bastante elevada cuando comparada con otras plantas existentes en la literatura ya mencionada. Sin embargo, queda en evidencia cuales etapas poseen mayor potencial de mejoría.

Como próximos trabajos se recomienda el análisis de algunas posibilidades como:

- Aprovechar la energía térmica emitida por el electrolizador por cogeneración, en un circuito de precalentamiento del hidrógeno antes de ser secado, con lo cual se reduciría el gasto de energía eléctrica de elevada calidad para estos procesos.
- Como vector energético, la utilización directa del hidrógeno producido, en células a combustible, almacenando solamente el exceso, reduciendo las perdidas por compresión.
- La utilización de fuentes renovables con generación de corriente continua, así como la energía solar, para alimentar la electrolisis evitaría las pérdidas ocasionadas por la rectificación.
- El oxígeno producido actualmente se libera al medio ambiente, este puede ser utilizado en una célula a combustible junto con el hidrógeno para generar energía eléctrica, con una mayor eficiencia que al utilizar aire. También puede ser almacenado para otros usos, como en hospitales, industrias de acero o para producción de otros compuestos químicos.

## 5. Agradecimientos

Agradecemos especialmente a la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana (UNILA), al *Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio* de la Fundación Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI), representados por su Gerente **Dr. Ricardo José Ferracin**, y al encargado de la Planta de Producción de Hidrógeno, **Dr. Reinaldo Cesar**, por el apoyo y la confianza, brindando el soporte y las informaciones necesarias para la realización de este trabajo científico.

## 6. Referencias

- BADWAL, S.; GIDDEY S. S.; MUNNINGS, C.; BHATT, A. I, HOLLENKAMP, A. F. *Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies*. Frontiers in Chemistry 2, 2014.
- BALL, M.; WIETSCHER, M. *The future of hydrogen- opportunities and challenges*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009.
- CABEZAS, M. D.; FRANK, A. E.; SANQUINETTI, A.; FRANCO J. I.; FASOLI H. J. *Hydrogen energy vector: Demonstration pilot plant with minimal peripheral equipment*. International Journal of Hydrogen Energy, 2014.
- CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinámica*. 7ma edición. McGraw Hill, 2012.
- COSKUN, C.; AKYUS, E.; OKTAY, Z.; DINCER, I. *Energy analysis of hydrogen production using biogas-based electricity*. International Journal of Hydrogen, 2011.
- CZUCZ B.; GATHAM J.; JOSEPH P.; MCPHERSON, GUY R. *The Impending Peak and Decline of Petroleum Production: an Underestimated Challenge for Conservation of Ecological Integrity*, 2010.
- DINCER, I.; ACAR, C. *Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability*. International journal of hydrogen energy, 2015.
- DINCER, I.; CENGEL, Y. A. *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering*, 2001.
- DOE (U.S. Department of Energy), *Hydrogen analysis Resource Center*, 2015. Disponible en: <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/hydrogen-production-energy-conversion-efficiencies>
- FCHART Software, EES Engineering Equation Solver, 2016. Disponible en: <http://www.fchart.com/ees/>.
- FERNANDEZ, A. M.; CANO, U. *Alkaline Electrolysis with Skeletal Ni Catalyst*, INTECH, 2012.
- FERREIRA, P. F. *Análise de Viabilidade de Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio Utilizando Celulas a Combustível*. Campinas, 2003.
- FPTI, *Fundacion Parque Tecnológico de Itaipu*, 2016. Disponible en: [www.pti.org.br/es/proyecto-hidrógeno](http://www.pti.org.br/es/proyecto-hidrógeno). Acceso en 06/06/2016.
- Fuel Cells Bulletin. *Hydrogen Fuel Cell Germany initiative has celebrity support*, 2016.
- FURLAN, André L. *Análise Técnica e Econômica do Uso do Hidrogênio como Meio Armazenador de Energia Elétrica Proveniente de Fontes Eólicas*. Campinas. SP, 2012.
- GAMMON, R. ; ROY, A.; BARTON, J.; LITTLE, M. *HYDROGEN AND RENEWABLES INTEGRATION (HARI)*, 2006.
- GARDINER, M. *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs*, 2009.
- GUGLIELMINI, P. *Corrosion phenomena in demineralized water cooling circuits*. JCOV, 2006.
- GUTIERREZ, D. A. *Análise Exergética e ambiental da produção e uso de biogás para geração distribuída*, 2014.
- H2Nitidor. *Installation Use and Maintenance manual prepared for Itaipu*, 2013.
- IEA (International Energy Agency). *World Energy Outlook 2015*, 2015.



- JALALZADEH, A. A. *Potential role of exergy in analysis of hydrogen infraestructura*. NHA Annual Hydrogen Conference, 2008.
- JIANJUN, L. *Advanced Materials for Renewable Hydrogen Production, Storage and Utilization*, 2015
- LI, Yan; HAN, P.; WANG, J.; SONG, X. *Geometric Process-Based Maintenance and Optimization Strategy for the Energy Storage Batteries*, 2016.
- LINARDI, M. *Hidrogênio e Células a Combustível*. Economia & Energia, 2010.
- LUCIA, U. *Overview on Fuel Cells*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014), 2014.
- LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. *The atmosphere: An Introduction to Meteorology*. 8th edition, 2000.
- MARTIN et al., D.C. *Management of variable electricity loads in wind, hydrogen systems: The case of Spanish wind farm*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010.
- MATOS, M. B. *Análise Energética de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias*. Campinas. SP, 2013.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th Edition. John Wiley & Sons, 2006.
- NU.ER.T., *Rotary Vane Pumps / Volumetric Rotary Vane Pumps Production*, 2016. Disponible en: <<http://www.nuert.com/pump-motors.php>>. Acceso en: 10 junio 2016.
- OLIVEIRA F. I. *Expansão da cana-de-açúcar na microrregião sudoeste de goiás: Análise espacial das mudanças do uso e cobertura do solo nos anos de 2001 2006 e 2011*, 2014.
- OLIVEIRA R.; SILVA R. D.; TOSTES M. E. *A methodology for analysis of cogeneration projects using oil palm biomass wastes as an energy source in the Amazon*, 2015.
- ONU. *Energía Sostenible para todos*. Asamblea General de las Naciones Unidas, 2011.
- ROSEN, M. A. *Energy and Exergy analyses of electrolytic hydrogen production*. International Journal of Energy, 1994.
- SANTOS, D. M; SEQUEIRA, C. A.; FIGUEIREDO, J. L. *Hydrogen production by alkaline water electrolysis*, Portugal. 2013.
- SGOBBI, A.; NIJS, W.; MIGLIO, R.; CHIODI, A; GARGIULO, M.; THIEL, C. *How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system*, 2015.
- SZARGUT, J. *Egzergia. Poradnik obliczania i stosowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice, 2007.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. *Exergy analysis of thermal, Chemical, and Metallurgical Process*. [s.l.] Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- TURNS, S. R.; *Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações*. Mac Graw Hill Education; 3.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R. *Fundamentals of Classical Thermodynamics* Hardcover, 1965.

- XIE, H.; YU, Q.; WANG, K.; SHI, X.; LI, X. *Thermodynamic analysis of hydrogen production from model compounds of bio-oil through steam reforming*. Environmental progress & Sustainable Energy, 2013.
- ZHUJUN J.;BOQIANG L. *China's energy demand and its characteristics in the industrialization and urbanization process*. Energy Policy, 2012.
- DINCER, I.; ROSEN M. A. *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development*, 2007.
- OLIVEIRA, R. C.; SILVA, R. D. S.; TOSTES, M. E. *A methodology for analysis of cogeneration projects using oil palm biomass wastes as an energy in the Amazon*, 2015.